

Dautzenberg, Alexander; Römmelt, Jörg; Rusche, Simon; Wenninger, Simon

Article — Published Version

E-Mobilität, Nachhaltigkeit und Digitalisierung im Einklang – Erkenntnisse und Best-Practices aus einem Living Lab

HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik

Provided in Cooperation with:

Springer Nature

Suggested Citation: Dautzenberg, Alexander; Römmelt, Jörg; Rusche, Simon; Wenninger, Simon (2025) : E-Mobilität, Nachhaltigkeit und Digitalisierung im Einklang – Erkenntnisse und Best-Practices aus einem Living Lab, HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, ISSN 2198-2775, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Vol. 62, Iss. 4, pp. 976-992, <https://doi.org/10.1365/s40702-025-01177-5>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/330425>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>



E-Mobilität, Nachhaltigkeit und Digitalisierung im Einklang – Erkenntnisse und Best-Practices aus einem Living Lab

Alexander Dautzenberg · Jörg Römmelt · Simon Rusche · Simon Wenninger

Eingegangen: 24. Januar 2025 / Angenommen: 1. April 2025 / Online publiziert: 28. April 2025
© The Author(s) 2025

Zusammenfassung Die Herausforderungen einer erfolgreichen digitalen Transformation unter gleichzeitiger Berücksichtigung eines nachhaltigen Wirtschaftens bereiten Unternehmen und Organisationen Kopfzerbrechen. Der Ansatz der sogenannten „Twin Transformation“, welcher die Synergiepotenziale zwischen digitaler und nachhaltiger Transformation heben soll, wird in Literatur und ersten Projekten als vielversprechend eingestuft. Allerdings wird hierbei oftmals dem Thema Mobilität wenig bis kaum Relevanz eingeräumt, obwohl gerade im betrieblichen Kontext Synergien und Schnittstellen zu den Themen Nachhaltigkeit und Digitalisierung vorliegen. Im Rahmen einer Fallstudie über das Living Lab des *fim* Forschungsinstituts für Informationsmanagement in Augsburg adressiert dieser Beitrag die skizzierte Lücke, wie wissenschaftliche Erkenntnisse im kleinen Rahmen in der Praxis Anwendung finden können, um E-Mobilität, Digitalisierung und Nachhaltigkeit im organisationalen Kontext gemeinsam voranzutreiben. Im Living Lab, welches unidirektionale und bidirektionale Ladesäulen für Elektrofahrzeuge umfasst, wird dabei unter Berücksichtigung von individuellen Nutzeranforderungen die Nutzung selbst

Alexander Dautzenberg

FIM Forschungsinstitut für Informationsmanagement, Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT, Alter Postweg 101, 86159 Augsburg, Deutschland
E-Mail: alexander.dautzenberg@fim-rc.de

Jörg Römmelt · ✉ Simon Rusche

FIM Forschungsinstitut für Informationsmanagement, Technische Hochschule Augsburg, Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT, Alter Postweg 101, 86159 Augsburg, Deutschland
E-Mail: simon.rusche@fim-rc.de

Jörg Römmelt

E-Mail: joerg.roemmelt@fim-rc.de

Simon Wenninger

FIM Forschungsinstitut für Informationsmanagement, Alter Postweg 101, 86159 Augsburg, Deutschland
E-Mail: simon.wenninger@siemens.com

erzeugten Solarstroms optimiert. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die intelligente Steuerung der Ladevorgänge sowohl die Betriebskosten gesenkt als auch der Eigenverbrauch und die Autarkie erhöht werden konnten. Dieser Beitrag schließt mit Best Practices und Handlungsempfehlungen, um die Akzeptanz und Nutzung von E-Fahrzeugen in Organisationen zu fördern und die Integration von Mobilitäts- und Energiestrategien durch digitale Technologien zu unterstützen.

Schlüsselwörter E-Mobilität · Nachhaltigkeit · Digitalisierung · Nutzerintegration · Energiemanagement · Bidirektionales Laden · Vehicle-to-Building

E-mobility, sustainability and digitalization im harmony – insights and best practices from a Living Lab

Abstract The challenges of a successful digital transformation while simultaneously considering sustainable management are causing headaches for companies and organizations. The “twin transformation” approach, which aims to leverage the synergy potential between digital and sustainable transformation, is seen as promising in the literature and initial projects. However, the topic of mobility is often given little to no relevance, although synergies with the topics of sustainability and digitalization exist within a business operation. As part of a case study on the Living Lab of the *fim* Research Institute for Information Management in Augsburg, this article addresses the outlined gap in how scientific findings can be applied in practice on a small scale to jointly promote e-mobility, digitalization and sustainability in an organizational context. In the Living Lab, which contains unidirectional and bidirectional charging stations for electric vehicles, the use of self-generated solar power is optimized, taking user requirements into account. The results show that intelligent control of charging processes can reduce operating costs and increase self-consumption and self-sufficiency. The article concludes with best practices and recommendations for action to promote the acceptance and use of e-vehicles in organizations and to support the integration of mobility and energy strategies.

Keywords E-mobility · Sustainability · Digitalization · User integration · Energy management · Bidirectional charging · Vehicle-to-building

1 Einleitung

Während viele Unternehmen immer noch damit beschäftigt sind, ihre Identität in einer digitalen Welt zu finden und die digitale Transformation zu meistern, schreitet die Klimakrise in großen Schritten voran und stellt Unternehmen und Organisationen vor weitere Herausforderungen. Mit den steigenden gesellschaftlichen Erwartungen zu nachhaltigerem Wirtschaften steigt der Druck und auch das unternehmerische Bewusstsein, Digitalisierung und Nachhaltigkeit gezielt miteinander in Einklang zu bringen. Viele Unternehmen erkennen bereits, dass eine sofortige Nachhaltigkeits-transformation unausweichlich ist, um den verschiedenen politischen, gesellschaft-

lichen und wirtschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden (Christmann et al. 2024).

In der Praxis wurden die Herausforderungen der Digital- und der Nachhaltigkeitstransformation jedoch häufig losgelöst voneinander angegangen und die erhofften Ergebnisse blieben hinter den Erwartungen zurück (Ollagnier et al. 2021). Der Ansatz der sogenannten „Twin Transformation“, welcher die Synergiepotenziale zwischen beiden genannten Transformationen heben soll, wird in der Literatur als auch in ersten Projekten als vielversprechend eingestuft, um schnellere Fortschritte zu erzielen (Christmann et al. 2024) und bietet bereits erste Leitfäden und Handlungsempfehlungen für Unternehmen (Crome et al. 2023). Hierbei wird allerdings oftmals dem zentralen Thema „Mobilität“ zu wenig Relevanz eingeräumt, welche gerade im betrieblichen Kontext Synergien und Schnittstellen zu den Themen Nachhaltigkeit und Digitalisierung aufweist. So bietet besonders die E-Mobilität nicht nur eine umweltfreundliche Alternative zu Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen, sondern ermöglicht es Unternehmen auch, ihre Flottenkosten zu senken und von staatlichen Förderungen zu profitieren (Costa et al. 2021; Ajanovic 2015). Durch die Integration von E-Fahrzeugen in den Betriebsalltag können Unternehmen ihre CO₂-Emissionen erheblich reduzieren und gleichzeitig auf die wachsende Nachfrage nach nachhaltigen Transportlösungen reagieren. Darüber hinaus kann die Schaffung eines umfassenden Konzepts zur E-Mobilität, einschließlich der Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für die Mitarbeitenden, das Engagement und die Akzeptanz innerhalb der Organisation und deren Mitarbeitenden fördern. Weiteres Potenzial bietet die Integration von E-Fahrzeugflotten und deren flexiblen Speicherkapazitäten (Barone et al. 2020; Wei et al. 2022; Englberger et al. 2019) in das betriebliche Energiemanagement und die Gebäudeautomation, um auf schwankende Energiepreise, aber auch der Verfügbarkeit von PV- oder Grünstrom mit dem intelligenten Laden der E-Fahrzeugflotte reagieren zu können (Dan und Zhou 2024). Dies führt nicht nur zu einer nachhaltigen Mobilität und ganzheitlichen Kostensenkung, sondern stärkt auch das Nachhaltigkeitsbewusstsein von Mitarbeitenden. Wie verschiedene Arbeiten (Zhang et al. 2020; Mroczek und Kolodynska 2020; Heredia et al. 2020) simulativ aufzeigen, scheint eine integrierte und ganzheitliche Betrachtung des Dreiklangs aus E-Mobilität, Nachhaltigkeit und Digitalisierung sinnvoll.

Trotz des Bewusstseins der individuellen Vorteile und Synergien bleibt die breite Umsetzung dieses Dreiklangs hinter den Erwartungen zurück und Unternehmen stellen sich die Frage, wie die Umsetzung in der Praxis aussehen kann. Dieser Beitrag zielt daher auf ebensolche Fragestellungen der Integration und Balance von E-Mobilität, Nachhaltigkeit und Digitalisierung ab.

Mit einer Fallstudie über das Living Lab des *fim* – Forschungsinstituts für Informationsmanagement in Augsburg, zeigt dieser Beitrag auf, wie wissenschaftliche Erkenntnisse im kleinen Rahmen in der Praxis Anwendung finden können, um E-Mobilität, Digitalisierung und Nachhaltigkeit im organisationalen Kontext gemeinsam voranzutreiben. Die Autoren haben das Living Lab von der Konzeption, über die Umsetzung, bis hin zum realen Betrieb federführend geleitet und führen ihre Erkenntnisse und retrospektive Analyse aus erster Hand in diesem Beitrag zusammen. Die Diskussion der Erfahrungen und Ergebnisse in den folgenden Kapiteln

schließt mit Handlungsempfehlungen und Best Practices für andere Organisationen in Forschung und Praxis ab.

2 Konzeptvorstellung

Im Anschluss an die thematische Einführung sowie Motivation dieser Forschungsarbeit widmet sich dieses Kapitel der detaillierten Darstellung des Konzepts des Living Labs am *fm* in Augsburg. Ziel ist es, die technische Infrastruktur und die angewandten Steuerungsmechanismen des Energiemanagementsystems transparent zu machen. Dabei wird erläutert, wie durch die Kombination von E-Mobilität, nachhaltigem Energiemanagement und Digitalisierung Synergiepotenziale ausgeschöpft werden können und die strategische Einbindung der Nutzenden gelingen kann.

2.1 Zielsetzung und Anforderungen

Mit der Zielsetzung, die Integration von Nachhaltigkeit, Digitalisierung und Mobilität in Verbindung mit Nutzerintegrität praxisnah zu erforschen, wurde am *fm* im Jahr 2021 mit dem Bau eines Living Labs begonnen. Dabei galt es, die Nutzung der ca. 1700 m² umfassenden Büroräumlichkeiten des *fm* – vorwiegend für Office-Tätigkeiten und Seminare – sowie den Mobilitätsbedarf zu berücksichtigen. Der Mobilitätsbedarf ergibt sich vornehmlich aus dem Pendelverkehr der Mitarbeitenden und Fahrten zu Projektpartnern, für die Poolfahrzeuge zur Verfügung stehen.

Die Fahrzeuge der Mitarbeitenden werden in der Regel morgens an die Ladesäulen angeschlossen und benötigen eine Aufladung bis zum Ende des Arbeitstages. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge nicht jeden Tag einen vollständigen Ladezyklus benötigen. Die unternehmenseigenen Poolfahrzeuge, die für dienstliche Aktivitäten wie Kundentermine oder Veranstaltungsbesuche genutzt werden, weisen unregelmäßigere Ladeanforderungen auf, da die Anforderungen stark mit den individuellen Buchungen der Fahrzeuge variieren. Jedoch ermöglicht das bestehende Buchungssystem eine bessere Planbarkeit der Ladebedarfe im Vergleich zu den Fahrzeugen der Mitarbeitenden. Dieses System bildet eine wichtige Grundlage für ein intelligentes und optimiertes Lademanagement.

2.2 Aufbau und Energiemanagement

Zur Erfüllung der Anforderungen wurde das Gebäude hardwareseitig umgerüstet. Seitdem verfügt das Gebäude über eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 44 kWp, sowie einen Batteriespeicher mit einer Kapazität von 12 kWh, der zur Zwischenspeicherung genutzt wird. Zusätzlich stehen neun Ladesäulen für Elektrofahrzeuge bereit. Davon sind sechs unidirektionale (UDL) Ladesäulen vorgesehen, die vor allem von den Fahrzeugen der Mitarbeitenden genutzt werden, und drei bidirektionale (BDL) Ladesäulen für die Poolfahrzeuge. Der bidirektionale Elektrofuhrpark besteht aus drei Fahrzeugen des Typs BMW i3 mit einer Batteriekapazität von jeweils 42 kWh, die als Poolfahrzeuge genutzt werden. Die maximale Ladeleistung der betrachteten Kombination von Elektrofahrzeug und Ladesäule beträgt 11 kW, die

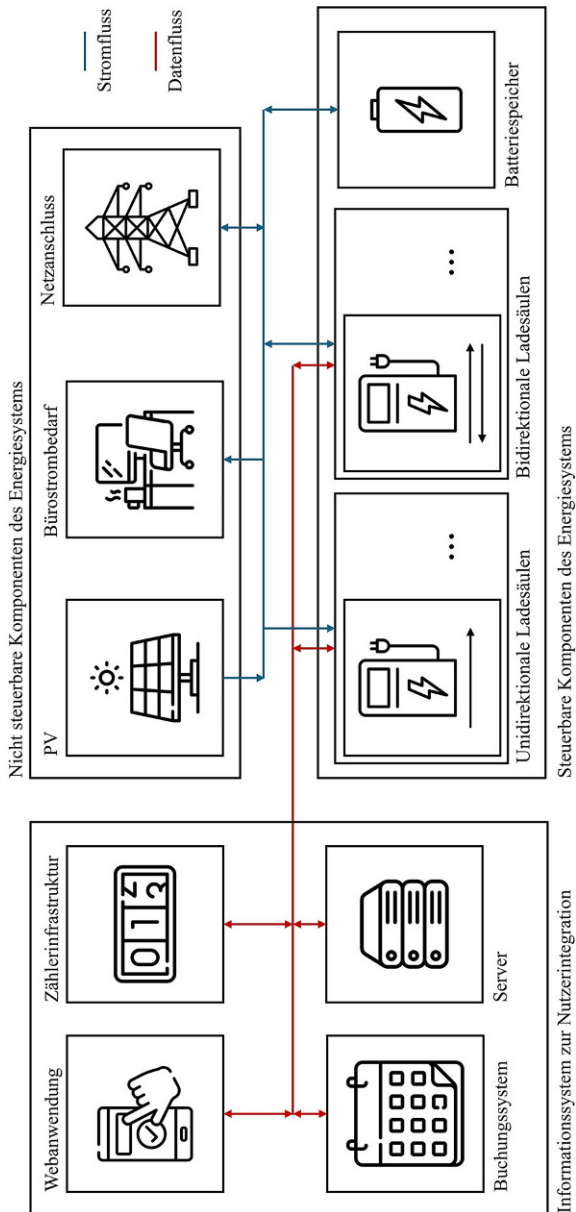


Abb. 1 Aufbau und Zusammenwirken der Komponenten des Energiesystems

für das Entladen nutzbare Kapazität beträgt ca. 80kWh. Eine umfassende Zählerinfrastruktur misst die Stromflüsse aller Komponenten im Living Lab und zeichnet diese seit Mitte 2022 minütlich auf. Abb. 1 gibt einen Überblick über die relevanten Komponenten des Energiesystems sowie die Strom- und Datenflüsse zwischen ihnen.

Das Energiemanagementsystem wurde entwickelt, um Energieflexibilität im Kontext dieser Infrastruktur zu veranschaulichen und nutzbar zu machen. Während der Schwerpunkt des Systems derzeit auf der Maximierung des Eigenverbrauchs liegt, könnten zukünftige Erweiterungen auch eine netzdienliche Steuerung oder externe Flexibilitätsvermarktung vorsehen, die im aktuellen Rechtsrahmen noch nicht umsetzbar sind. Ein Optimierungsmodell realisiert die Energieflexibilität durch Steuerung der Ladevorgänge basierend auf einer PV-Prognose, Verbrauchsprognose für den Bürostrombedarf, den Anforderungen an die Mobilität und den Ladeständen der bidirektionalen Fahrzeuge. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Energiekosten unter der Bedingung, dass die Bedürfnisse der Nutzer der E-Mobilität erfüllt und unnötige Einschränkungen vermieden werden.

Bei den unidirektionalen Ladevorgängen wird eine Mindeststromstärke festgelegt. Diese liegt standardmäßig tagsüber bei 6 A, welche der geringsten Ladestufe des Typ-2 Ladestands entspricht. Damit können sich die Nutzenden darauf verlassen, dass im Verlauf eines Arbeitstags mindestens ca. 100km¹ Reichweite nachgeladen werden. Darüber hinaus hat das Optimierungssystem die Möglichkeit, die Ladeleistung abhängig von der Ladefähigkeit des angeschlossenen Fahrzeugs und des verfügbaren PV-Überschusses bis auf 32 A zu erhöhen. Nachts ist die Ladung standardmäßig pausiert. Über eine Webanwendung haben die Nutzer die Möglichkeit, nach individuellem Bedarf die Mindestladeleistung zu erhöhen und das Laden auch nachts zu aktivieren.

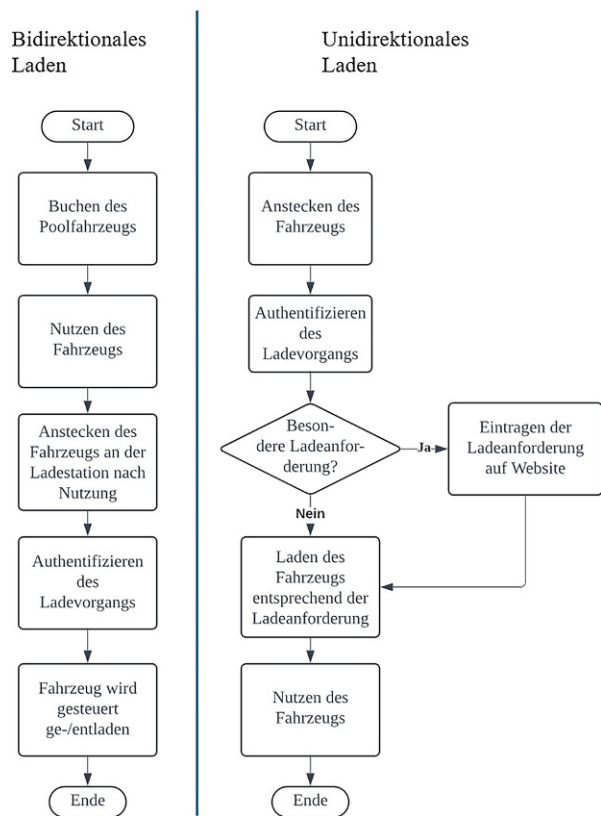
Die bidirektionalen Fahrzeuge bieten deutlich umfassendere Flexibilitätsoptionen. Da bei diesen Fahrzeugen der Ladezustand über die Ladesäule und die nächste geplante Nutzung über das Buchungssystem klar bestimmt ist, kann der Ladevorgang sehr flexibel gesteuert werden. Darüber hinaus besteht durch die Fähigkeit der Autos, den gespeicherten Strom zurückzuspeisen, weitere Flexibilität. Durch Verwenden des CCS-Standards ist zudem die wattgenaue Steuerung möglich.

2.3 Nutzendenintegration

Die Umsetzung des Energiemanagementsystems wurde so gestaltet, dass die spezifischen Anforderungen der beiden Ladesäulen-Typen optimal berücksichtigt werden. Für die unidirektionalen Ladestationen wird die Mindestladeleistung innerhalb definierter und an die Mitarbeitenden kommunizierter, monatlich unterschiedlicher Zeitfenster während der erwarteten Sonnenstunden garantiert. Dies erzeugt bei den Nutzern ein hohes Maß an Sicherheit, dass ihre Fahrzeuge bis zum Tagesende ausreichend geladen sind. Darüber hinaus erfolgt die weitere Ladung an den unidirektionalen Ladestationen ausschließlich mit überschüssiger Energie aus der Photovoltaikanlage, solange für die Ladung der bidirektionalen-Fahrzeuge kein vorrangiger Energiebedarf besteht. Nutzern der unidirektionalen Ladestationen wird zusätzlich über eine den Mitarbeitenden zugängliche Webanwendung die Möglichkeit geboten, bei Bedarf die Ladeleistung ihres Fahrzeugs individuell zu erhöhen. Diese Anpassung erfolgt jedoch explizit nur für einzelne Ladevorgänge. Dieser Ansatz ist das

¹ Die 100km ergeben sich aus der unteren Ladeleistung von 4kW, einer angenommenen Mindestladedauer von 6h und einem Verbrauch (inklusive Ladeverlusten) von max. 24kWh pro 100km.

Abb. 2 Ablauf der Interaktion von Nutzenden mit Schnittstellen des Energiemanagementsystems



Ergebnis einer längeren Testphase, bei der Feedback der Nutzer zur Steuerung eingeholt wurde und wurde letztendlich gewählt, um zu verhindern, dass die Ladeleistung standardmäßig erhöht wird, obwohl der Bedarf nicht regelmäßig besteht.

Während der ersten beiden Jahre der Testphase wurden unterschiedliche Steuerungskonzepte für das unidirektionale Laden evaluiert. Eine erste reine Überschussladung ohne Möglichkeit der Steuerung durch den Nutzer ließ den Nutzern zu viel Unsicherheit über die geladene Menge. Um dies zu adressieren, wurde die Steuerung für zunächst zwei der Ladesäulen angepasst, sodass diese durchgehend eine Mindestladeleistung, einmal 4 kW, einmal 11 kW zur Verfügung stellten. Bei entsprechender Überschussenergie aus der Photovoltaikanlage wurde die Ladeleistung dieser beiden Ladesäulen dennoch erhöht. So konnten die Nutzer durch Auswahl der Ladesäule ihre jeweilige Ladeanforderung ausdrücken. Mit der steigenden Anzahl an Nutzern der Ladesäule gab es hierbei immer häufiger das Problem, dass keine Ladesäule mit passender Steuerung frei war und so nicht ausreichend oder über das erforderliche Maß hinaus geladen wurde. Zudem konnten gewisse Ladeanforderungen nicht gut abgebildet werden. Ein Nutzer, der beispielsweise eine Ladeleistung von 6 kW gewünscht hätte, musste bei dieser Steuerung auf die Ladesäule mit einer Mindestladeleistung von 11 kW ausweichen. In Folge wurde mithilfe der Weban-

wendung die Möglichkeit geschaffen, an allen Ladesäulen das jeweils passende Ladeprofil einzustellen.

Die Steuerung der bidirektionalen Ladestationen erfolgt größtenteils automatisiert. Hierbei lesen die Ladesäulen eigenständig den Ladestand der Poolfahrzeuge aus und berücksichtigen darüber hinaus die Informationen aus dem bestehenden Buchungssystem, um den Ladebedarf präzise zu bestimmen. Für die Nutzenden wurde bewusst ein möglichst geringer Interaktionsaufwand angestrebt: Es genügt, das gewünschte Fahrzeug über das Buchungssystem zu reservieren. Alles Weitere übernimmt das Energiemanagementsystem. Dies stellt sicher, dass ein Fahrzeug stets mindestens eine Stunde vor Beginn des nächsten dienstlichen Termins vollgeladen ist und dabei den ökonomischen Nutzen des eigenerzeugten Stroms maximiert. Es wurde darauf verzichtet, aus den Buchungen die Zieldestination oder erwartbare Fahrdistanz abzuleiten, um mögliche Komplexität und Missverständnisse zu vermeiden. Um die Ladeprioritäten zu gewährleisten, müssen die Poolfahrzeuge mindestens vier Stunden vor einem Termin gebucht werden. Innerhalb dieses Zeitfensters können sie an den vorhandenen Ladesäulen vollständig geladen werden, selbst wenn der Akkustand auf einem Minimum beginnt.

Der unterschiedliche Ablauf der Nutzerinteraktion zwischen unidirektionalen und bidirektionalen Ladevorgängen ist in Abb. 2 dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass die Nutzerintegration beim bidirektionalen Laden vor dem Anstecken des Fahrzeugs an die Ladesäule beginnt und der Ladevorgang so im Vorhinein energetisch berücksichtigt werden kann, während bei unidirektionalen Ladevorgängen erst mit dem Anstecken und Authentifizieren des Fahrzeugs der Ladevorgang für die Steuerung sichtbar wird. Des Weiteren zeigt der unverzweigte Ablauf beim bidirektionalen Laden, dass Nutzende keine bewusste Entscheidung über ihre gewünschte Ladeleistung treffen müssen.

3 Erkenntnisse aus dem Living Lab

Basierend auf der im vorangegangenen Kapitel dargestellten Konzeption und Implementierung des Living Labs werden in diesem Kapitel empirische Erkenntnisse analysiert, die im Rahmen des Betriebs des Living Labs und der Nutzung der Ladeinfrastruktur gewonnen wurden. Der Fokus liegt dabei auf der Evaluation der Auswirkungen des entwickelten und implementierten Steuerungskonzepts auf Lade- und Entladevorgänge, Eigenverbrauchsquoten, Autarkiegrade sowie Strombezugskosten, stets unter Berücksichtigung der betriebliche Mobilitätsbedarfe. Dies umfasst sowohl quantitative als auch qualitative Aspekte, um ein umfassendes Verständnis der praktischen Umsetzung zu ermöglichen.

3.1 Mobilität und Einbindung der Nutzenden

Die Nutzung der drei batterieelektrischen Poolfahrzeuge für Dienstreisen und damit die Verfügbarkeit für steuerbares bidirektionales Laden während des Zeitraums, in dem das Buchungssystem für die BDL-Poolfahrzeuge betrieben wurde (01.07.2023–30.11.2024), ist in hohem Maße fahrzeugabhängig (s. Tab. 1). Trotz

Tab. 1 Nutzung der Poolfahrzeuge

Fahrzeug	Gebuchte Termine [1]	Gebuchte Stunden [h]	Gefahrene Distanz [km]
Fahrzeug 1	52	691,67	12.334,0
Fahrzeug 2	34	553,82	7462,0
Fahrzeug 3	12	166,75	5439,0

Tab. 2 Ladeenergie der Poolfahrzeuge (Annahme für Berechnung: Verbrauch = 15,8 kWh/100 km)^a

Fahrzeug	Mit Zählerinfrastruktur gemessen		Für Dienstreisen berechnet	
	Beladen [kWh]	Entladen [kWh]	Beladen [kWh]	Entladen [kWh]
Fahrzeug 1	14.807,04	7691,42	1887,10	0,0
Fahrzeug 2	18.597,67	9442,21	1141,69	0,0
Fahrzeug 3	17.274,12	9555,48	832,17	0,0

^aMittlerer Energieverbrauch kombiniert für den BMW i3 nach technischen Daten (BMW 2025a)

der Gleichwertigkeit der Poolfahrzeuge zeigt das Nutzungsverhalten eine mit steigender Nummerierung abnehmende Nutzungsintensität. Diese heterogene Nutzungsverteilung ist vermutlich in der eigenständigen Auswahl des Fahrzeugs durch die Mitarbeitenden und einer eindeutig geordneten Nummerierung der Fahrzeuge begründet.

In Tab. 2 sind die tatsächlich ge- und entladenen Energiemengen den auf Basis der gefahrenen Entfernung sowie des angegebenen Durchschnittsverbrauchs berechneten Energiemengen für Dienstreisen gegenübergestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass die reisebedingten Ladevorgänge nur einen Bruchteil der tatsächlichen Ladeenergie ausmachen. Diese Beobachtung ist durch eine intensive Nutzung der BDL-Poolfahrzeuge als temporär verfügbare Stromspeicher zu erklären. Darüber hinaus ist ein deutlicher Unterschied des Energiebedarfs für Dienstreisen und der Netto-Beladung der Fahrzeuge sichtbar. Dabei zahlen verschiedene Ursachen auf diesen Unterschied ein. Erstens unterliegen sowohl Lade- und Entladevorgänge als auch der fahrzeugeigene Batteriespeicher nicht-vernachlässigbaren Energieverlusten. Zweitens verursacht der fahrzeuginterne Stromrichter, welcher als Kommunikationschnittstelle zur Ladeinfrastruktur fungiert, auch im Ruhezustand einen Strombedarf im Bereich von 100–150 W. Diese Effizienzverluste sind vor dem Hintergrund zu betrachten, dass sowohl die BDL-Poolfahrzeuge als auch die bidirektionalen Ladesäulen prototypischer Natur waren. Bei serienreifen BDL-fähigen Kombinationen von Fahrzeug und Ladesäulen ist aus Sicht der Autoren von einem höheren Effizienzgrad auszugehen.

Interessant ist außerdem die negative Korrelation von gebuchten Stunden und Entladeenergie sowie die Tatsache, dass die Beladeenergie der Fahrzeuge 2 und 3 trotz geringerer gebuchter Stunden und gefahrener Distanz größer ist als bei Fahrzeug 1. Eine intelligente und entsprechend ausgerichtete Steuerung der bidirektionalen Ladeinfrastruktur vorausgesetzt, kann die geringe Nutzungsintensität von Fahrzeugen durchaus positive ökonomische und ökologische Wirkweisen ermöglichen. Die Beladeenergie ist dabei unter anderem abhängig von der Anschlussdauer an einer bidirektionalen Ladesäule, der gefahrenen Distanz, der Höhe von Ener-

Tab. 3 Spezifikation und Ergebnisse der betrachteten Szenarien

	Szenario A	Szenario B	Szenario C	Szenario D
<i>Spezifikation</i>				
Poolfahrzeuge	Benzin-Tanken	Ungesteuertes UDL-Laden	Ungesteuertes UDL-Laden	Gesteuertes BDL-Laden
Mitarbeitenden-fahrzeuge	Gesteuertes UDL-Laden	Ungesteuertes UDL-Laden	Gesteuertes UDL-Laden	Gesteuertes UDL-Laden
<i>Ergebnisse</i>				
Eigenverbrauchsquote [%]	52,30	49,42	52,92	69,23
Autarkiegrad [%]	48,23	42,98	46,02	57,57
Strombezugskosten [EUR]	1386,99	1730,04	1655,85	1530,81
Kraftstoffbezugskosten [EUR]	2703,75 ^a	0,00	0,00	0,00

^aBerechnet basierend auf den Fahrkilometern, dem mittleren Energieverbrauch kombiniert für den BMW 1er (als ein mit dem BMW i3 vergleichbarer benzinbetriebener Verbrenner-PKW) nach technischen Daten (BMW 2025b) und den monatlichen Verbraucherpreisen für Superbenzin in Deutschland 2024 (en2x 2024)

gieverlusten beim Be- und Entladen sowie möglichen Stand-by-Verbräuchen des Elektroautos.

Die Implementierung des intelligenten und optimierten Lademanagements sowie die damit verbundenen Nutzungsprozesse wurden von den Mitarbeitenden überwiegend sehr positiv aufgenommen. Ein zentraler Faktor für das hohe Akzeptanzniveau gegenüber dem bidirektionalen Laden von Poolfahrzeugen ist dabei die Sicherheit der Nutzenden in Bezug auf die Bereitstellung der Fahrzeuge gewesen. Sowohl der angestrebte Ladezustand von 100 % bei Reisebeginn – unabhängig von Reiseziel, -dauer und -strecke – als auch die vorzeitige Bereitstellung erhöhen dabei die Resilienz gegenüber Planabweichungen und vergrößern somit den Aktionsraum der Mitarbeitenden. Darüber hinaus erhöhte die einfache Integration in bestehende Systeme, wie die Nutzung von *Microsoft Outlook*-Kalendern, die Akzeptanz erheblich.

Ein wichtiger Schritt für die erfolgreiche Adaption des flexiblen, unidirektionalen Lademanagement durch Mitarbeitende zum Laden eigener Elektrofahrzeuge ist die Entwicklung und der Einsatz der erwähnten Webanwendung gewesen. Auf diese Weise wurde Mitarbeitenden die Möglichkeit eingeräumt, gewisse Parameter des Ladevorgangs (Mindestladeleistung, Einhaltung der täglichen Zeitfenster) entsprechend ihrer individuellen – und möglicherweise täglich variierenden – Anforderungen selbst steuern zu können. Diese Steuerungsmöglichkeit und -verantwortung beugt Unzufriedenheit aufgrund von Diskrepanz zwischen Realität und Erwartung bei Beendigung des Ladevorgang vor. Außerdem konnten durch den Einsatz der Webanwendung die Transparenz über die Ladevorgänge und somit die Nachvollziehbarkeit der Resultate deutlich erhöht werden. All diese Faktoren haben sich positiv in Akzeptanz und Systemadoption der Mitarbeitenden niedergeschlagen. Gleichzeitig zeigte sich auch, dass eine transparente Kommunikation über die Funktionsweise des Lademanagements essenziell ist, um Unsicherheiten in der Nutzung und potenzielle Widerstände zu minimieren.

3.2 Quantifizierung der Auswirkungen auf Systemebene

Die der Steuerungslogik zugrundeliegende Idee lässt sich gut an einem exemplarischen Tag mit ausgeprägter, den inflexiblen Strombedarf während der Tagstunden deutliche übersteigenden Stromerzeugung der Photovoltaik-Anlage veranschaulichen. An einem solchen typischen (sonnigen) Tag werden die verfügbaren bidirektionalen Elektrofahrzeuge tagsüber mit dem Erzeugungsüberschuss der Photovoltaikanlage geladen. Unabhängig von der Nutzung von Beleuchtungs- und Klimatisierungsanlagen in den Büroräumlichkeiten sind diese durch eine Grundlast von etwa 1,5 bis 2,5 kW charakterisiert. Während der Nachtstunden konnte dieser Strombedarf, eine entsprechende Beladung der bidirektionalen Elektrofahrzeuge während der Tagesstunden vorausgesetzt, durch eine gesteuerte Entladung der bidirektionalen Fahrzeuge gedeckt werden. Auf diese Weise konnte für bestimmte Perioden ein Autarkiegrad von >95 % erreicht werden. Ein exemplarischer Zeitraum, an dem die implementierte Steuerung entsprechend verfahren hat und so den Bezug von Strom aus dem öffentlichen Netz weitestgehend reduziert (Autarkiegrad >99 %) ist der 29. Juni 2024 (s. Abb. 3).

Die ganzheitliche Integration einer uni- und bidirektionalen Elektroflotte in ein dezentrales Energiesystem beeinflusst dieses auf vielfältige Weise. Die konkreten Auswirkungen hängen dabei eng von der gewählten Zielgröße der Steuerung ab. Mögliche Ziel- und Messgrößen für die Steuerung eines dezentralen Energiesystems, wie das System des *fm* in Augsburg, können auf unterschiedlichen Parametern basieren. Häufig werden hierbei Konzepte wie Autarkie und Eigenverbrauch² zur Beschreibung der Auslegung dezentraler Erzeugungsanlagen (in Kombination mit stationären Speichern) im Verhältnis zum Stromverbrauch am selben Netzverknüpfungspunkt herangezogen. Ebenso finden in Praxis und Forschung Strombeschaffungskosten als zu minimierende ökonomische Zielgröße häufig Berücksichtigung.

Im Folgenden werden die Auswirkungen des gesteuerten uni- und bidirektionalen Ladens, wie in Kap. 2 beschrieben, hinsichtlich verschiedener Messgrößen evaluiert.

Um diesen Effekt zu quantifizieren, werden den aufgezeichneten Stromflüssen, -verbräuchen und -einspeisungen bei gesteuertem unidirektionalem Laden von Mitarbeitendenfahrzeugen und bidirektionalem Laden von Poolfahrzeugen (Szenario D) drei simulierte Alternativszenarien (Szenarien A–C) gegenübergestellt (vgl. Tab. 3). Das erste Alternativszenario (Szenario A) beschreibt die Gewährleistung des Mobilitätsangebots für Dienstreisen in Form von benzinbetriebenen Verbrenner-PKW anstelle BDL-fähiger Batterie-Elektrofahrzeuge. Dementsprechend geht aus dieser Komponente des Lademanagements kein Stromverbrauch hervor. Im zweiten Alternativszenario (Szenario B) wird angenommen, dass sowohl Mitarbeitendenfahrzeuge als auch die drei elektrischen Poolfahrzeuge ausschließlich ungesteuert unidirektional geladen werden. Dies bedeutet, dass ein verknüpftes Fahrzeug, dessen Batterie einen Ladezustand < 100 % aufweist, stets mit der maximal möglichen Ladeleistung (11 kW, unter Vernachlässigung einer rückläufigen Entwicklung der Ladeleistung bei

² Folgende Berechnungsvorschriften werden für die Ermittlung von Eigenverbrauchsquote EVQ und Autarkiegrad AG genutzt: $EVQ = \frac{\text{Eigenverbrauch}}{\text{Gesamtstromerzeugung (PV)}}$ $AG = \frac{\text{Eigenverbrauch}}{\text{Gesamtstromverbrauch}}$

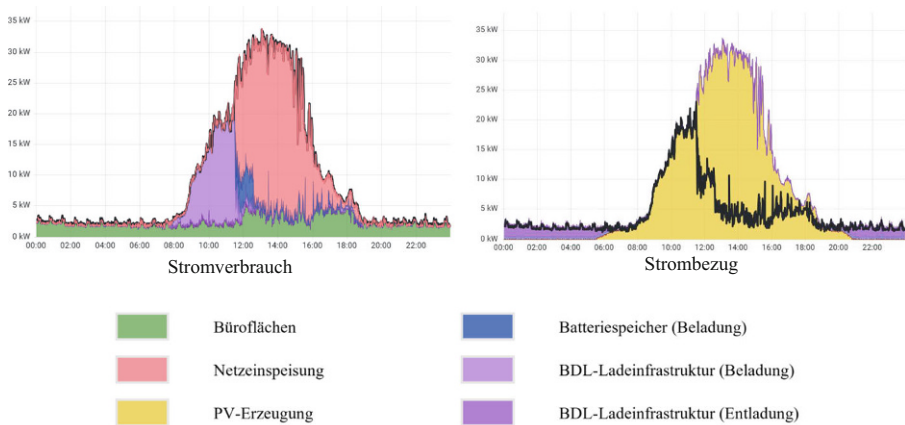


Abb. 3 Zusammensetzung von Stromverbrauch und Strombezug im Living Lab am 29.07.2024

steigendem Ladezustand) geladen wird, bis eine maximale Batterieladung erreicht ist. Im dritten Alternativszenario (Szenario C) wird ausschließlich das unidirektionale Laden der Mitarbeitendenfahrzeuge aktiv gesteuert, während die Poolfahrzeuge, wie in Szenario B, ungesteuert geladen werden.

Die Auswertung für das Jahr 2024 in Tab. 3 zeigt ein deutlich höheres Niveau sowohl der Eigenverbrauchsquote als auch des Autarkiegrads für Szenario D (gesteuertes UDL- und BDL-Laden entsprechend der Aufzeichnungen) gegenüber den drei Alternativszenarien. So liegen die Eigenverbrauchsquote und der Autarkiegrad für gesteuertes Laden um 40,10 % (19,82 %-Punkte) und 33,96 % (14,59 %-Punkte) über den Werten für ungesteuertes Laden. Während die BDL-Ladeinfrastruktur unter anderem die Zwischenspeicherung selbsterzeugten Stroms aus der Photovoltaik-Anlage ermöglicht, realisieren die UDL-Ladesäulen eine weitestgehend flexible Ladeleistung entlang des schwankenden Erzeugungsprofils. Auf diese Weise kann der Stromverbrauch entsprechend der eigenen Erzeugungsleistung flexibilisiert werden. Infolgedessen ergeben sich die beobachteten positiven Effekte (s. Abb. 4 im Anhang für eine monatliche Betrachtung von Eigenverbrauch und Autarkie).

Eine weitere Perspektive auf die Auswirkungen der ganzheitlichen Integration und Steuerung ermöglicht die ökonomische Betrachtung anhand der Strombezugs-kosten. Auch aus dieser ökonomischen Sichtweise lassen sich die Vorteile einer aktiv gesteuerten Ladeinfrastruktur unter Integration der Nutzenden klar quantifizieren und erkennen. Der Vergleich mit (teilweise) ungesteuertem Laden (Szenarien B und C) birgt über den betrachteten Zeitraum eine totale Kosteneinsparung hinsichtlich der Strombezugs-kosten (exkl. Netzentgelten) von 125,04 €, beziehungsweise 199,23 €. Währenddessen fallen die Strombeschaffungskosten für Szenario A am geringsten aus, da infolge der Nicht-Betrachtung des Lademanagements für Poolfahrzeug der Stromverbrauch sinkt. Gleichzeitig entstehen in diesem Szenario durch die Bereitstellung benzinbetriebener Verbrenner-PKW für Dienstgeschäfte der Mitarbeitenden zusätzliche Kosten in Höhe von 2703,75 € für den Bezug von Benzin an öffentlichen Tankstellen. Diese Kraftstoffbezugs-kosten übersteigen die Einsparungen bei Strombezugs-kosten deutlich, sodass Szenario A die höchsten Gesamtkosten

vorweist. Darüber hinaus kann aufgrund der Abhängigkeit von Zeitpunkt und Ort der Stromentnahme sowie unzureichender Verfügbarkeit entsprechender Daten keine exakte Aussage über die Entwicklung der CO₂-Emissionen unter den verschiedenen Szenarien getroffen werden. Tendenziell ist jedoch anzunehmen, dass eine geringere jährliche Stromentnahmemenge mit geringeren (Scope-2-)CO₂-Emissionen einhergeht.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Integration von Elektromobilität in ein betriebliches Energiemanagement nicht zu einem geringeren Autarkiegrad führen muss und sogar zu wesentlichen Steigerungen führen kann. Somit ergeben sich aus der intelligenten und adaptiven Steuerung der Lade- und Entladevorgänge sowie anforderungsorientierten Einbindung verschiedener Nutzergruppen in das Management der beschriebenen UDL- und BDL-Ladeinfrastruktur sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile. Die Komplementarität der Ziele verschiedener Dimensionen der Nachhaltigkeit ist aus unternehmerischer Sicht von großer Bedeutung für die zukunftsfähige Ausrichtung von Unternehmen.

3.3 Übertragbarkeit und Handlungsempfehlungen

Die im Living Lab erzielten Ergebnisse zeigen, dass eine intelligente Integration von E-Mobilität, Energiemanagement und Digitalisierung erhebliche Optimierungs- und Synergiepotenziale freisetzen kann. Um die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf andere Kontexte zu ermöglichen, lassen sich zentrale Erfolgsfaktoren ableiten, die als Orientierung und Blaupause für andere Organisationen dienen können. Eine strukturierte Vorgehensweise bei der Implementierung vergleichbarer Konzepte umfasst mehrere essenzielle Aspekte.

Zunächst ist eine belastbare Datenbasis entscheidend, da die Qualität und Präzision der Steuerung und Optimierung maßgeblich von der Verfügbarkeit und Genauigkeit relevanter Daten abhängt. Hierzu zählen Ladeprofile, Fahrzeugverfügbarkeiten, Nutzungspräferenzen sowie Echtzeitinformationen zur Energieerzeugung und -nutzung. Je detaillierter diese Informationen erfasst und analysiert werden, desto gezielter können Flexibilitätspotenziale genutzt und die Integration der Nutzenden gefördert werden.

Darüber hinaus sollte eine technologische Offenheit gewährleistet sein, sodass das System unabhängig von spezifischen Herstellern betrieben werden kann und sowohl für unidirektionale (UDL) als auch bidirektionale (BDL) Ladetechnologien geeignet ist. Diese Interoperabilität ermöglicht nicht nur eine flexiblere Implementierung, sondern trägt auch zur Zukunftssicherheit der Lösung bei.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die benutzerfreundliche Gestaltung der Interaktionsmodule. Um die Akzeptanz zu fördern, sollte die Bedienung so intuitiv sein, dass auch Nutzende ohne technisches Fachwissen problemlos mit dem System interagieren können. Dies wurde im Living Lab durch die Nutzung bestehender Buchungssysteme (*Microsoft Outlook*), einer interaktiven Webanwendung sowie durch eine weitgehende Automatisierung der Ladevorgänge umgesetzt.

Zudem spielt die Festlegung eines geeigneten und angemessenen Standardbetriebs der Ladeinfrastruktur eine wichtige Rolle. Indirekte Verhaltenssteuerung (Nudging) kann durch gezielte Voreinstellungen, beispielsweise eine garantierte Mindestlade-

leistung nur während der Tagesstunden, zur Optimierung der Energieeffizienz beitragen. Dies dient nicht nur der Nutzerfreundlichkeit, sondern kompensiert auch – aufgrund der unidirektionalen Kommunikation des Typ-2 Ladestandards – nicht vorhandene Daten zu Lade- und Fahrzeugzustand, insbesondere bei unidirektionalen Ladeprozessen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Erkenntnisse des Projekts bestätigen vergangene Forschungsergebnisse und lassen folgende Best Practices und Erkenntnisse ableiten:

- Grundsätzlich konnten die Betriebskosten durch die ganzheitliche Integration gesenkt, sowie der Eigenverbrauch und die Autarkie gesteigert werden. Es ist allerdings anzumerken, dass bei zunehmender E-Mobilität ein Kipppunkt erreicht werden kann, ab dem lediglich der Eigenverbrauchsanteil erhöht werden kann und die Autarkie rückläufig ist.
- Die Umsetzung der Buchung der BDL-Poolfahrzeuge via *Microsoft Outlook*-Kalendern hat sich als ebenso einfacher wie effektiver Lösungsansatz erwiesen. Es erscheint daher empfehlenswert, zu Beginn eines solchen Projektes auf bestehende und einfach integrierbare Lösungen zu setzen, um Investitionen gering zu halten.
- Im Rahmen der Umsetzung hat sich bewährt, dass die Konnektivität und Kommunikation zwischen den verschiedenen Systemen essenziell sind. Im betrieblichen Kontext sollte daher die hauseigene IT von Beginn involviert werden, um frühzeitig Netzwerk und Firewalls unter Berücksichtigung von Datenschutz und Sicherheitskonzepten vorzubereiten.
- Das im vorliegenden Artikel vorgestellte Konzept ist das Produkt fortlaufender Evaluation und Iteration während des Projektzeitraums. Aufgrund der Tatsache, dass präzise Anforderungen zu Beginn eines Projekts häufig nicht feststehen und sich im Verlauf des Prozesses sowie der tatsächlichen Nutzung verändern können, wird ein sequenzieller und iterativer Ansatz empfohlen.
- Mobilitäts- und Energiestrategie sind eng miteinander verzahnte Themen, die nicht isoliert, sondern gemeinsam betrachtet werden sollen. Hier gilt es, sich wandelnde Mobilitätsnutzungsweisen sowie globale Trends wie der Shift hin zu Home-Office zu berücksichtigen.
- Eine offene Kommunikation und Einbindung aller Mitarbeitenden in der Organisation hat Akzeptanz geschaffen, die Nutzung der E-Fahrzeugflotte nachhaltig gestärkt, und einen nachhaltigeren Umgang mit Mobilitätsbedarfen gefordert.

Der Beitrag ergänzt bisherige Erkenntnisse und Arbeiten, die sich oftmals auf simulative Untersuchungen und theoretische Konzepte beschränken, durch Erfahrungen aus der Praxis. So unterstreichen die gewonnenen Erkenntnisse die Potenziale und Machbarkeit der Kopplung von Elektromobilität und Energiesystem im organisationalen Kontext. Diese tragen sowohl zur Motivation zukünftiger Forschung für aufbauende und tiefgreifendere Untersuchungen bei als auch zur Förderung einer breiten Umsetzung durch Praktiker:innen, die das Konzept und die Best Practices

als Blaupause für eigene Vorhaben verwenden und davon ausgehend individuelle Anpassungen vornehmen können.

Auch wenn die praktische Erprobung des Konzepts mittlerweile im zweiten Jahr stattfindet und die Ergebnisse für sich sprechen, ergeben sich natürlicherweise Limitationen hinsichtlich der Übertragbarkeit. Erstens wurde das Konzept und vor allem die technische Umsetzung auf das vorhandene Energiesystem sowie die Integration der bestehenden Ladeinfrastruktur zugeschnitten. Die Übertragbarkeit auf andere oder komplexere Energiesysteme und Hardware erfordert daher eine Detailbetrachtung und entsprechenden Implementationsaufwand. Folglich wäre für die Kommerzialisierung des Konzepts weitere Arbeit notwendig. Zweitens setzt das präsentierte Konzept einen Fokus auf die technische Integration von Elektroflotte und Energiesystem und vernachlässigt zu einem gewissen Grad die Einbindung der Nutzer im Flottenmanagement. Damit konnten bislang noch keine langfristigen Effekte hinsichtlich Nutzung und Akzeptanz des Flottenmanagements erhoben werden. Im Rahmen weiterer Forschungsaktivitäten könnten weitere Erfahrungen und Daten gesammelt werden, um Effekte und Akzeptanz zu quantifizieren.

Das Projekt hat einmal mehr verdeutlicht, dass es möglich ist, Elektromobilität in Organisationen ganzheitlich zu integrieren, dies aber auch mit entsprechendem Aufwand verbunden ist.

5 Anhang

Bei einer monatlichen Betrachtung ergibt sich ein differenzierteres Bild: Während Eigenverbrauchsquote und Autarkie insbesondere in den Wintermonaten, d. h. in Perioden im Vergleich zum Jahresdurchschnitt geringer Sonneneinstrahlung, über alle Szenarien hinweg sehr ähnliche Werte annehmen, ist in den Monaten mit relativ hoher Sonneneinstrahlung eine deutliche Disparität zwischen den Szenarien erkennbar. In diesen Monaten (April–Oktober) zeigt die Auswertung eine deutliche Zunahme von Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad für das gesteuerte Laden (Szenario D) gegenüber dem (teilweise) ungesteuerten Laden. Während unter Szenario D in den Monaten Juni und Juli Autarkiegrade $>90\%$ erreicht werden, verzeichnen die Alternativszenarien A–C Autarkiegrade von maximal $76,38\%$; für das ungesteuerte Laden (Szenario B) bemisst sich der maximale monatliche Autarkiegrad sogar nur auf $69,21\%$ und somit über 20% -Punkte weniger.

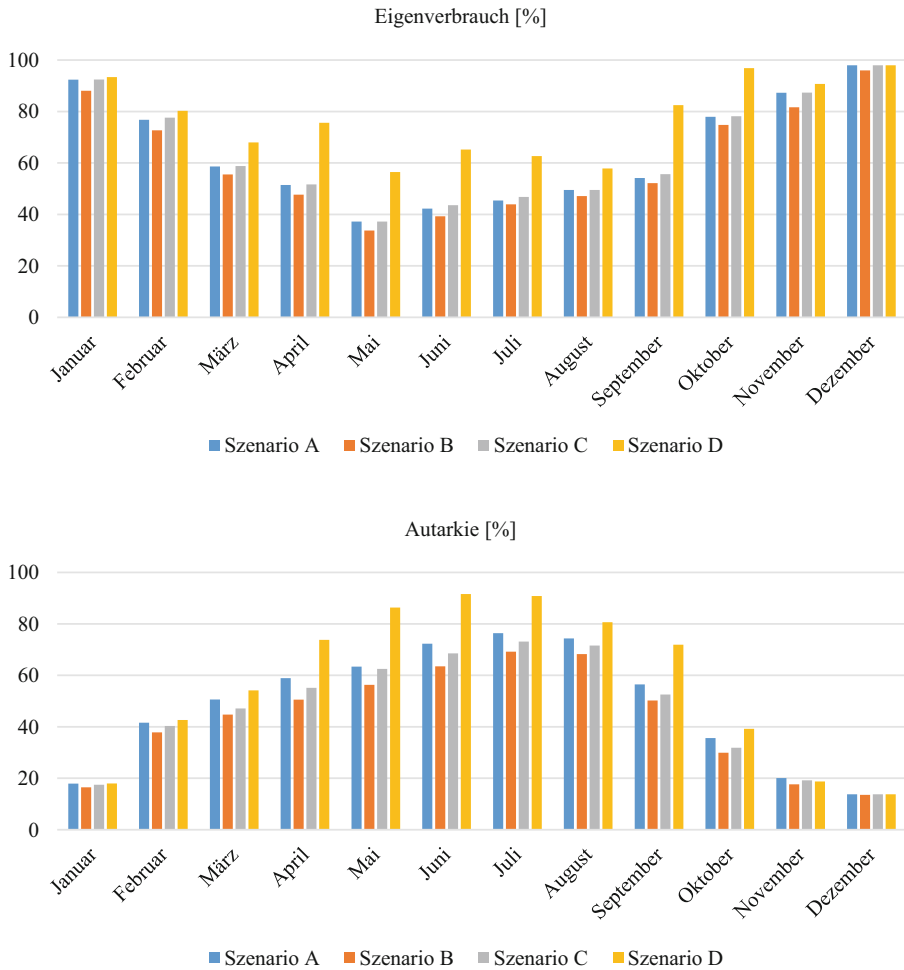


Abb. 4 monatlicher Eigenverbrauch und Autarkie betrachteter Szenarien

Förderung Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Kopernikus-Projekts Synergie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und die Projektbetreuung durch den Projektträger Jülich (PtJ).

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere

Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Ajanovic A (2015) The future of electric vehicles: prospects and impediments. *Wires Energy Environ* 4:521–536. <https://doi.org/10.1002/wene.160>
- Barone G, Buonomano A, Forzano C, Giuzio GF, Palombo A (2020) Increasing self-consumption of renewable energy through the Building to Vehicle to Building approach applied to multiple users connected in a virtual micro-grid. *Renew Energy* 159:1165–1176. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.101>
- BMW (2025a) Technische Daten des BMW i3. <https://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2021/bmw-i3-ueberblick.html#technische-daten>. Zugegriffen: 15. Jan. 2025
- BMW (2025b) Technische Daten des BMW 1er.; BMW 120. <https://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/1er/bmw-1er/bmw-1er.html>. Zugegriffen: 15. Jan. 2025
- Christmann A-S, Crome C, Graf-Drasch V, Oberländer AM, Schmidt L (2024) The twin transformation butterfly. *Bus Inf Syst Eng* 66:489–505. <https://doi.org/10.1007/s12599-023-00847-2>
- Costa CM, Barbosa JC, Castro H, Gonçalves R, Lanceros-Méndez S (2021) Electric vehicles: to what extent are environmentally friendly and cost effective?—comparative study by european countries. *Renew Sustain Energy Rev* 151:111548. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111548>
- Crome C, Graf-Drasch V, Meyer-Hollatz T, Oberländer AM, Urbach N (2023) Digital und nachhaltig die Zukunft sichern; Wie Unternehmen die Twin Transformation als Vorreiter meistern können. <https://www.fit.fraunhofer.de/content/dam/fit/wirtschaftsinformatik/dokumente/ey-studie-digital-und-nachhaltig-die-zukunft-sichern-februar-2023.pdf>. Zugegriffen: 23. März 2025
- Dan Z, Zhou Y (2024) Integrated energy flexible building and e-mobility with demand-side management and model predictive control *Advances in Digitalization and Machine Learning for Integrated Building-Transportation Energy Systems*. Elsevier, S 45–61
- en2x (2024) Monatliche Verbraucherpreise für Mineralölprodukte 2005–2024. <https://en2x.de/service/statistiken/verbraucherpreise/>. Zugegriffen: 15. Jan. 2025
- Englberger S, Hesse H, Kucevic D, Jossen A (2019) A techno-economic analysis of vehicle-to-building: battery degradation and efficiency analysis in the context of coordinated electric vehicle charging. *Energies* 12:955. <https://doi.org/10.3390/en12050955>
- Heredia WB, Chaudhari K, Meintz A, Jun M, Pless S (2020) Evaluation of smart charging for electric vehicle-to-building integration: a case study. *Appl Energy* 266:114803. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114803>
- Mroczek B, Kolodynska A (2020) The V2G process with the predictive model. *IEEE Access* 8:86947–86956. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991329>
- Ollagnier JM, Brueckner M, Berjoan S, Dijkstra S (2021) The European double up: A twin strategy that will strengthen competitiveness. Accenture. <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/a-com-migration/r3-3/pdf/pdf-144/accenture-the-european-double-up.pdf#zoom=50>. Zugegriffen: 15. Jan. 2025
- Wei H, Zhang Y, Wang Y, Hua W, Jing R, Zhou Y (2022) Planning integrated energy systems coupling V2G as a flexible storage. *energy* 239:122215. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122215>
- Zhang C, Greenblatt JB, MacDougall P, Saxena S, Jayam Prabhakar A (2020) Quantifying the benefits of electric vehicles on the future electricity grid in the midwestern United States. *Appl Energy* 270:115174. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115174>

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.